DESIGN, DEVELOPMENT AND CONTROL OF BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR DRIVES FOR CEILING FAN

AMIT KUMAR

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

HAUZ KHAS, NEW DELHI-110016, INDIA

July 2025

© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2025

DESIGN, DEVELOPMENT AND CONTROL OF BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR DRIVES FOR CEILING FAN

by

AMIT KUMAR

Department of Electrical Engineering

Submitted

in fulfillment of the requirements of the degree of

Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

HAUZ KHAS, NEW DELHI-110016, INDIA

July 2025

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled **"Design, Development and Control of Brushless Direct Current Motor Drives for Ceiling Fan"** being submitted by **Mr. Amit Kumar** for an award of the degree of **Doctor of Philosophy** in the Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, is a record of the research work carried out by him under my supervision and guidance. The matter embodied in this thesis has not been submitted for any other degree or diploma award.

Dated: July 07, 2025

Place: New Delhi

(Prof. Bhim Singh)
Department of Electrical Engineering
Indian Institute of Technology Delhi,
Hauz Khas, New Delhi-110016, India

ACKNOWLEDGEMENTS

I wish to express my deepest gratitude and indebtedness to **Prof. Bhim Singh** for providing me guidance and consistent supervision to carry out the Ph.D. work. Working under him has been a wonderful experience, and it has provided me with deep insight into the world of research. Determination, dedication, innovativeness, resourcefulness, and discipline of **Prof. Bhim Singh** have been the inspiration for me to complete this work. His consistent encouragement, continuous monitoring and commitment to excellence have always motivated me to improve my work and use the best of my capabilities. Due to his blessing, I have earned various experiences other than research, which will help me throughout my life.

My sincere thanks and deep gratitude to all S.R.C. members, **Prof. N. Senroy,** and **Prof. Anandarup Das,** Department of Electrical Engineering, and **Prof. Ashu Verma,** Department of Energy Science and Engineering, IIT Delhi, for their valuable guidance and consistent support during my research work. I wish to convey my sincere thanks to **Prof. G. Bhuvaneswari (Mahindra and Mahindra University, Hyderabad)** and **Prof. Ramkrishna Maheswari (University of Southern Denmark, SDU Denmark),** for providing valuable guidance and necessary support during this work, which made the foundation for my research work.

I wish to express my sincere thanks to the government of India for helping financially under the SERB NSC fellowship. Thanks are due to Mr. Gurcharan Singh, Mr. Srichand, Mr. Puran Singh, Mr. Jitendra, Mr. Boorla Sagar Kumar, Mr. Abhinav Gohar, Mr. Sumit Kumar Singh, Mr. Md. Ale Imran, and Mrs. Neeru Asija of PG Machine Lab, UG & PG Power Electronics Lab, and Communication Lab, IIT Delhi for providing me facilities and assistance during this work. I would also like to thank Mr. Yatindra Mani Tripathi, Mr. Satish Sah, Mr. Sandeep Arora and all other Electrical Engineering office and Lab staff for being supportive throughout the process.

I would like to give special thanks to my batch mates, Mr. Pushpendra Yadav, Dr. Jitendra Gupta, Dr. Souvik Das, and Mr. Utsav Sharma, for their valuable time, motivation, cooperation, and support during my research work. I am also thankful to my seniors, Dr. Utkarsh Sharma, Dr. Shailendra Kumar, Dr. Anshul Varshney, Dr. Radha Kushwaha, Dr. Anjeet Verma, Dr. Vashist Bist, Mr. Saurabh Manglik, and Dr. Rahul Pandey for their valuable aid and cooperation and informal support during this period.

Moreover, I would like to thank my juniors and colleagues, Mr. Saran Kumar Chaurasiya, Mr. Sayandev Ghosh, Mr. Vipin Kumar Singh, Mr. Himansu Sahoo, Mr. Gaurav Kumar, Mr. Rahul Kumar Garg, Mr. Gaurav Kaushik, Mr. Shreyansh Upadhyaya, Mr. Bathala Venugopal, Mr. Abhshek Giri, Mr. Satish Kumar Paturi, Mr. Dattu Suresh and Mr. Nishant Kumar Singh and all PG Machines and PG Power Electronics Lab group for their valuable support. I am thankful to those who have directly or indirectly helped me finish my dissertation study.

Blessings of my father, Late Sh. Hori Lal have always strengthened me in my entire life. My richest love, appreciation and indebtedness go to my mother, Smt. Ganga Devi for her dreams and sacrifices, and wholeheartedly endorses them. Her trust and trust in my capabilities have always motivated me to reach higher academic degrees. I sincerely thank my wife, Mrs. Vineeta, and her elder sister, Mrs. Geeta Kumari, for their continuous support, motivation, and encouragement. Their trust in my capabilities was a key factor in my achievements. I must express my appreciation to my brother, Mr. Khyali Ram, for handling family responsibilities and for his kind support.

At last, I am beholden to the almighty for their blessings to help me to raise my academic level to this stage. I pray for their benediction in my future endeavors. Their blessings may be showered on me for strength, wisdom, and determination to achieve in the future.

Dated: July 07, 2025

Place: New Delhi

Amit Kumar

ABSTRACT

The development of permanent magnet brushless direct current motor (PMBLDCM) drives has focused on energy efficiency and cost reduction, owing to their superior features compared to traditional motors. PMBLDCMs offer high efficiency, high torque to weight ratio, compact size, high power density, silent operation, exceptional reliability, and minimal wear and tear, making them an ideal choice for various low to medium-power applications. These characteristics have led to their widespread use in various household appliances like ceiling fans, mixer juicers, table fans, exhaust fans, and air conditioning.

This thesis aims to develop high-frequency power factor correction (PFC) converters for cost-effective PMBLDCM drives specifically designed for low-power ceiling fan applications. The PMBLDCM relies on a three-phase voltage source inverter (VSI) for electronic commutation, which is facilitated by rotor position sensing using Hall-Effect sensors. Traditional PMBLDCM ceiling fan drive (CFD) operates on a single-phase AC supply through an uncontrolled diode bridge rectifier (DBR), passive PFC, continuous conduction mode (CCM) buck PFC, or CCM flyback PFC, combined with a high value electromagnetic interference filter and DC-link capacitor. This system draws a distorted and peaky current rich in harmonics, resulting in high total harmonic distortion (THD) and an elevated crest-factor in the supply current, leading to a poor power factor (PF) at the supply input. These high current harmonic distortions exceed the limits specified by IEC 61000-3-2 for Class D equipment. To address these issues, single-phase high-frequency AC-DC PFC converters are employed to enhance the power factor and minimize THD at the supply input.

The selection of an appropriate PFC converter for low-power PMBLDCM based CFD depends on various factors, such as the number of components in the converter, the voltage and power ratings of the motor, the need for galvanic isolation, and the overall CFD system cost and efficiency. Based on this, PFC converter configurations are categorized into five types: non-isolated high-frequency PFC converters, isolated high-frequency PFC converters, non-isolated high-frequency integrated PFC converters, isolated high-frequency integrated PFC converters, and high-frequency bridgeless non-isolated/isolated PFC converters. High-frequency bridgeless configurations are specifically designed to reduce conduction losses in the front-end high-frequency PFC converter by partially or fully eliminating the diode bridge rectifier. Additionally,

the control strategy of the high-frequency PFC converter plays a crucial role in determining the overall CFD system's performance and cost. In this work, high-frequency PFC converters are designed to achieve high step-down gain with their desired operating duties and operate in discontinuous inductor current mode (DICM). The DC-link voltage of these high-frequency PFC converters is controlled using a voltage follower approach, eliminating the need for voltage and current sensors.

This work presents the analysis, design, DICM modeling, and control of buck-boost categorized high-frequency PFC converters to enhance power quality at the supply input of a PMBLDCM based CFD. A key focus is placed on simplifying control mechanisms, minimizing the number of sensors, reducing costs, and improving the overall efficiency of the CFD system. Additionally, some new configurations of single-phase high-frequency AC-DC PFC converters are proposed for powering the PMBLDCM drive used in ceiling fan applications. The speed of the PMBLDCM is controlled by adjusting the DC-link voltage of the VSI, which drives the PMBLDCM. This approach enables the VSI to operate with fundamental frequency switching, thereby reducing switching losses.

A novel sensorless control method for high-frequency AC-DC PFC converters is also developed to control the DC-link voltage. Additionally, a simple back-EMF-based sensorless control approach for the PMBLDCM is designed, allowing variable DC-link voltage control for speed change of the motor. The performance of these high-frequency PFC converters fed PMBLDCM based CFDs is validated through models created in the MATLAB/Simulink environment. Experimental verification is also conducted using a laboratory-developed hardware prototype of the sensorless high-frequency PFC converters feeding PMBLDCM based CFD. Performance evaluation encompasses steady-state performance at different operating speeds, dynamic performance during speed change, and robustness against supply voltage fluctuations at the AC supply input. Steady-state analysis includes the voltage and current key waveforms of high-frequency PFC converter components (MOSFET switch, inductor, high-frequency transformer, diode, and capacitor) to establish component selection criteria. Furthermore, the presented high-frequency PFC converters demonstrate compliance with power quality standards, maintaining supply current harmonic distortion within limits specified by IEC 61000-3-2 for Class D. These findings underscore the potential of the presented high-frequency PFC based PMBLDCM drives as energy-efficient, cost-effective, and high-performance solutions for ceiling fan applications.

सार

स्थायी चुंबक ब्रशलेस डायरेक्ट करंट मोटर (पीएमबीएलडीसीएम) ड्राइव के विकास ने ऊर्जा दक्षता और लागत में कमी पर ध्यान केंद्रित किया है, क्योंकि पारंपरिक मोटरों की तुलना में ये बेहतर विशेषताएं प्रदान करते हैं। पीएमबीएलडीसीएम उच्च दक्षता, उच्च बलाघूर्ण-भार अनुपात, जटिल आकार, उच्च शक्ति घनत्व, शांत संचालन, असाधारण विश्वसनीयता और न्यूनतम टूट-फूट प्रदान करते हैं, जो उन्हें विभिन्न निम्न से मध्यम-शक्ति अनुप्रयोगों के लिए एक आदर्श विकल्प बनाता है। इन विशेषताओं के कारण इनका उपयोग विभिन्न घरेलू उपकरणों जैसे छत का पंखा, रस निकालने का उपकरण, मेज़ का पंखा, निष्कासक पंखा और वातानुकूलन में व्यापक रूप से किया जाता है।

इस शोध प्रबंध का उद्देश्य विशेष रूप से कम-शक्ति वाले छत के पंखों के अनुप्रयोगों के लिए डिज़ाइन किए गए लागत-प्रभावी पीएमबीएलडीसीएम ड्राइव के लिए उच्च-आवृत्ति पावर फैक्टर करेक्शन (पीएफसी) कनवर्टर विकसित करना है। पीएमबीएलडीसीएम इलेक्ट्रॉनिक कम्यूटेशन के लिए तीन-चरण वोल्टेज स्रोत इन्वर्टर (वीएसआई) पर निर्भर करता है, जिसे हॉल-इफेक्ट सेंसर का उपयोग करके रोटर स्थिति संवेदन द्वारा सुगम बनाया जाता है। पारंपरिक पीएमबीएलडीसीएम सीलिंग फैन ड्राइव (सीएफडी) एक अनियंत्रित डायोड ब्रिज रेक्टिफायर (डीबीआर), पैसिव पीएफसी, कंटीन्यूअस कंडक्शन मोड (सीसीएम) बक पीएफसी, या सीसीएम फ्लाईबैक पीएफसी के माध्यम से एकल-फेज एसी आपूर्ति पर संचालित होता है, जिसे उच्च मान वाले इलेक्ट्रोमैग्नेटिक इंटरफेरेंस फ़िल्टर और डीसी-लिंक कैपेसिटर के साथ जोड़ा जाता है। यह प्रणाली हार्मोनिक्स से भरपूर एक विकृत और चरम धारा खींचती है, जिसके परिणामस्वरूप उच्च टोटल हार्मोनिक डिस्टॉर्शन (टीएचडी) और आपूर्ति धारा में एक उच्च क्रेस्ट-फैक्टर होता है, जिससे आपूर्ति इनपुट पर एक खराब पावर फैक्टर (पीएफ) होता है। ये उच्च धारा हार्मोनिक विकृतियाँ आईईसी. ६१०००-३-२ द्वारा वर्ग डी उपकरणों के लिए निर्दिष्ट सीमाओं से अधिक हैं। इन समस्याओं के समाधान के लिए, आपूर्ति इनपुट पर पावर फैक्टर को बढ़ाने और टीएचडी को न्यूनतम करने के लिए एकल-फेज उच्च-आवृत्ति एसी-डीसी पीएफसी कन्वर्टर्स का उपयोग किया जाता है।

कम-शक्ति वाले पीएमबीएलडीसीएम आधारित सीएफडी के लिए उपयुक्त पीएफसी कनवर्टर का चयन कई कारकों पर निर्भर करता है, जैसे कनवर्टर में घटकों की संख्या, मोटर की वोल्टेज और पावर रेटिंग, गैल्वेनिक आइसोलेशन की आवश्यकता, और समग्र सीएफडी प्रणाली की लागत और दक्षता। इसके आधार पर, पीएफसी कनवर्टर विन्यास को पाँच प्रकारों में वर्गीकृत किया गया है: गैर-पृथक उच्च-आवृत्ति पीएफसी कनवर्टर, पृथक उच्च-आवृत्ति पीएफसी कनवर्टर, गैर-पृथक उच्च-आवृत्ति एकीकृत पीएफसी कनवर्टर, पृथक उच्च-आवृत्ति एकीकृत पीएफसी कनवर्टर, और उच्च-आवृत्ति ब्रिजलेस गैर-पृथक/पृथक पीएफसी कनवर्टर। उच्च-आवृत्ति ब्रिजलेस विन्यास विशेष रूप से डायोड ब्रिज रेक्टिफायर को आंशिक या पूर्ण रूप से हटाकर फ्रंट-एंड उच्च-आवृत्ति पीएफसी कनवर्टर में चालन हानि को कम करने के लिए डिज़ाइन किए गए हैं। इसके अतिरिक्त, उच्च-आवृत्ति पीएफसी कनवर्टर की नियंत्रण रणनीति समग्र सीएफडी प्रणाली के प्रदर्शन और लागत को निर्धारित करने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाती है। इस कार्य में, उच्च-आवृत्ति वाले पीएफसी कन्वर्टर्स को उनके वांछित परिचालन कर्तव्यों के साथ उच्च

स्टेप-डाउन लाभ प्राप्त करने और असंतत प्रेरक धारा मोड (डीआईसीएम) में संचालित करने के लिए डिज़ाइन किया गया है। इन उच्च-आवृत्ति वाले पीएफसी कन्वर्टर्स के डीसी-लिंक वोल्टेज को वोल्टेज फॉलोअर दृष्टिकोण का उपयोग करके नियंत्रित किया जाता है, जिससे वोल्टेज और धारा सेंसर की आवश्यकता समाप्त हो जाती है।

यह कार्य पीएमबीएलडीसीएम आधारित सीएफडी के आपूर्ति इनपुट पर विद्युत गुणवत्ता बढ़ाने के लिए बक-बूस्ट श्रेणीबद्ध उच्च-आवृत्ति वाले पीएफसी कन्वर्टर्स का विश्लेषण, डिज़ाइन, डीआईसीएम मॉडलिंग और नियंत्रण प्रस्तुत करता है। नियंत्रण तंत्र को सरल बनाने, सेंसरों की संख्या को कम करने, लागत कम करने और सीएफडी प्रणाली की समग्र दक्षता में सुधार करने पर मुख्य ध्यान केंद्रित किया गया है। इसके अतिरिक्त, सीलिंग फैन अनुप्रयोगों में उपयोग किए जाने वाले पीएमबीएलडीसीएम ड्राइव को शक्ति प्रदान करने के लिए एकल-चरण उच्च-आवृत्ति वाले एसी-डीसी पीएफसी कन्वर्टर्स के कुछ नए विन्यास प्रस्तावित किए गए हैं। पीएमबीएलडीसीएम की गति को वीएसआई के डीसी-लिंक वोल्टेज को समायोजित करके नियंत्रित किया जाता है, जो पीएमबीएलडीसीएम को चलाता है। यह दृष्टिकोण वीएसआई को मूल आवृत्ति स्विचिंग के साथ संचालित करने में सक्षम बनाता है, जिससे स्विचिंग हानियाँ कम होती हैं।

उच्च-आवृत्ति वाले एसी-डीसी पीएफसी कन्वर्टर्स के लिए डीसी-लिंक वोल्टेज को नियंत्रित करने हेतु एक नवीन सेंसर रहित नियंत्रण विधि भी विकसित की गई है। इसके अतिरिक्त, पीएमबीएलडीसीएम के लिए एक सरल बैक- ईएमएफ-आधारित सेंसर रहित नियंत्रण दृष्टिकोण डिज़ाइन किया गया है, जो मोटर की गति परिवर्तन के लिए परिवर्तनशील डीसी-लिंक वोल्टेज नियंत्रण की अनुमति देता है। पीएमबीएलडीसीएम आधारित सीएफडी से पोषित इन उच्च-आवृत्ति वाले पीएफसी कन्वर्टर्स के प्रदर्शन का सत्यापन मैटलैब/ सिमुलिंक वातावरण में निर्मित मॉडलों के माध्यम से किया जाता है। पीएमबीएलडीसीएम आधारित सीएफडी से पोषित सेंसर रहित उच्च-आवृत्ति वाले पीएफसी कन्वर्टर्स के प्रयोगशाला-विकसित हार्डवेयर प्रोटोटाइप का उपयोग करके प्रायोगिक सत्यापन भी किया जाता है। प्रदर्शन मूल्यांकन में विभिन्न परिचालन गतियों पर स्थिर-अवस्था प्रदर्शन, गति परिवर्तन के दौरान गतिशील प्रदर्शन, और एसी आपूर्ति इनपुट पर आपूर्ति वोल्टेज में उतार-चढ़ाव के प्रति मजबूती शामिल है। स्थिर-अवस्था विश्लेषण में घटक चयन मानदंड स्थापित करने के लिए उच्च आवृत्ति पीएफसी कनवर्टर घटकों (एमओएसएफईटी स्विच, प्रारंभ करनेवाला, उच्च आवृत्ति ट्रांसफार्मर, डायोड और संधारित्र) के वोल्टेज और वर्तमान प्रमुख तरंगों को शामिल किया जाता है। इसके अलावा, प्रस्तुत उच्च-आवृत्ति पीएफसी कन्वर्टर्स विद्युत गुणवत्ता मानकों के अनुपालन को प्रदर्शित करते हैं, तथा आपूर्ति धारा हार्मोनिक विरूपण को वर्ग डी के लिए आईईसी. ६१०००-३-२ द्वारा निर्दिष्ट सीमाओं के भीतर बनाए रखते हैं। ये निष्कर्ष छत पंखा अनुप्रयोगों के लिए ऊर्जा-कुशल, लागत-प्रभावी और उच्च-प्रदर्शन समाधान के रूप में प्रस्तुत उच्च-आवृत्ति पीएफसी आधारित पीएमबीएलडीसीएम ड्राइव की क्षमता को रेखांकित करते हैं।

TABLE OF CONTENTS

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

LIST OF ABBREVIATIONS

AC	Alternating Current
ACIECA	Average Current Injection Equivalent Circuit Approach
BL	Bridgeless
CF	Ceiling Fan
CFD	Ceiling Fan Drive
CCM	Continuous Conduction Mode
CIB-SIC	Coupled-Inductor Based Switched-Inductor Cuk
CrCM	Critical Conduction Mode
DSP	Digital Signal Processor
DBR	Diode Bridge Rectifier
DC	Direct Current
DICM	Discontinuous Inductor Current Mode
DVM	Discontinuous Voltage Mode
EMD	Electrical Motor Drive
EMI	Electromagnetic Interference
HFT	High-Frequency Transformer
HSDG	High Step Down Gain
IPQ	Improved Power Quality
IIBF-PFC	Integrated Isolated Buck-Flyback Power Factor Correction
IEC	International Electrotechnical Commission
LPF	Low Pass Filter
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PMBLDCM	Permanent Magnet Brushless Direct Current Motor
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
PSCIM	Permanent-Split Capacitor Induction Motor

PLC	Phase Lead Compensator
PPQ	Poor Power Quality
PF	Power Factor
PFC	Power Factor Correction
PWM	Pulse Width Modulation
SEPIC	Single Ended Primary Inductance Converter
SPIM	Single Phase Induction Motor
S^4BF-PFC	Single-Stage Single-Switch Boost-Flyback Power Factor Correction
SPQ	Supply Power Quality
SC	Switched Capacitor
SI	Switched Inductor
SIC	Switched Inductor Cuk
SRM	Switched Reluctance Motor
THD	Total Harmonic Distortion
UPF	Unity Power Factor
VSI	Voltage Source Inverter

LIST OF SYMBOLS

C_a & C_b	Output Switched Capacitors
C_{buck}	Buck Converter Capacitor
C_{DC}	DC-link Capacitor
C_{EMI}	Electromagnetic Interference Capacitor
C_i	Intermediate Capacitor
C_{i1} & C_{i2}	Intermediate Input and Output Capacitors
C_o	Converter Output Capacitor
D	Converter Operating ON Duty
D_1	Converter OFF Duty
D_a & D_b	High-Frequency Output Diodes of Switched Inductor Branch
D_{boost}	High-Frequency Boost Converter Diode
D_{buck}	High-Frequency Buck Converter Diode
D_e	High-Frequency Extra Diode
D_f	High-Frequency Forward Converter Diode
D_{fb}	High-Frequency Flyback converter diode
D_{l1}=D_{l2}	Line Frequency Diodes
D_{max} & D_{min}	Maximum and Minimum Operating ON Duty
D_o	High-Frequency Output Diode
D_r	High-Frequency Reset Diode
D_{sig}	High-Frequency Signal Diode
f_{sw}	Switching Frequency (kHz)
i_{Lmg}	Magnetizing Current of High-Frequency Transformer
I_o	Average Load Current (A)
$i_o(t)$	Instantaneous Load Current
i_s	Supply RMS Current (mA)

$i_{s(pk)}$	Supply Peak Current (mA)
i_{sw}	Switch Current (mA)
$i_{sw(pk)}$	Peak Switch Current
$(i_o)_{avg}$	Average Output Current Before the DC-link Capacitor
K	Conduction Parameter
K_v	Constant Voltage Gain
L_a &L_b	Output Switched-Inductors
$L_{b(buck)}$	Buck Converter Inductor
L_{EMI}	Electromagnetic Interference Inductor
L_i	Input Inductor
L_{mg}	Magnetizing Inductance of High-Frequency Transformer
L_o	Output Inductor
L_s	SEPIC Inductor
M	Gain of Converter
$m_k(t)$	High-Frequency Carrier Signal
M_{min} & M_{max}	Minimum and Maximum Gain of Converter
N	Speed of CFD in RPM
N^*	Reference Speed of CFD in RPM
N_a	Auxiliary Winding Turns of High-Frequency Transformer
N_p	Number of Primary Turns of High-Frequency Transformer
$N_p/N_s=n$	Primary to Secondary Turns Ratio of High-Frequency Transformer
N_r	Number of Turns in Reset Winding of High-Frequency Transformer
N_s	Number of Secondary Turns of High-Frequency Transformer
P_{in}	Input Power
P_{max}	Maximum Power
P_{out}	Output Power
R_{eq}	Equivalent Load Resistance

S_1-S_6	Voltage Source Inverter MOSFET Switches
S_w	MOSFET Switch
T_{sw}	Switching Period
V_{aux}	Auxiliary Winding Voltage
V_{aux}^*	Reference Auxiliary Winding Voltage
V_c	Controlled Voltage of PI-Controller
V_{DC}	DC-link voltage (V)
V_e	Error Voltage
V_{GS}	Gate to Source Voltage (V)
V_{in}	Average Input Voltage
$V_p = V_{w1}$	Primary Winding Voltage of High-Frequency Transformer
V_s	Supply RMS Voltage (V)
$V_{s(pk)}$	Supply Peak Voltage
V_{sw}	Switch Voltage (V)
$V_{sw(pk)}$	Peak Switch Voltage
V_{w2}	Secondary Winding Voltage of High-Frequency Transformer